Transport Canada
Development

Transports Canada
Développement

TP 5588E

Electric Locomotive Evaluation

Summary Report

Prepared for
Transportation
Development Centre
Transport Canada

MARCH 1984

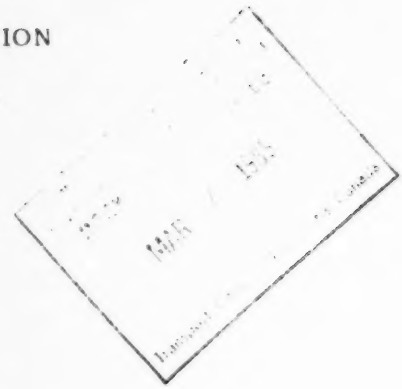
CA2 ON
UQU 325
83
R13S
c.2

Canada

CIGGT Project No. PRO-145

CIGGT Report No. 83-13(S)
Transport Canada Report No. TP 5588E

ELECTRIC LOCOMOTIVE EVALUATION
EXECUTIVE SUMMARY



E.R. Corneil
G.W. English
H. Boumeester

prepared for

Transportation Development Centre, Transport Canada

Canadian Institute of Guided Ground Transport
Queen's University at Kingston, Ontario
K7L 3N6

March 1984

This report resulted from research conducted through the Canadian Institute of Guided Ground Transport. The report represents the views of the authors and does not necessarily have the endorsement of the University or the other participating organizations.

Cette sommaire également disponible en français.

REPORT DOCUMENTATION FORM

1. Transport Canada Report No.	2. TDC Project No.	3. Recipient's Catalogue No.
TP 5588E	4888	

4. Title and Subtitle	5. Report Date
ELECTRIC LOCOMOTIVE EVALUATION EXECUTIVE SUMMARY	March 1984
	6. Performing Organization Report No. 83-13(S)
7. Author(s) E.R. Corneil, G.W. English, H. Boumeester	8. Transport Canada File No. D1465-317-5
9. Performing Organization Name and Address Canadian Institute of Guided Ground Transport (CIGGT) c/o Queen's University Kingston, Ontario K7L 3N6	10. DSS File No. 48SZ.T8200-2-2562
	11. DSS or Transport Canada Contract No. OSZ 82-00098
12. Sponsoring Agency Name and Address Transportation Development Centre (TDC) 1000 Sherbrooke Street West, Suite 2421 Montreal, Quebec H3A 2R3	13. Type of Report and Period Covered 02/83-03/84
	14. Sponsoring Agency Code
15. Supplementary Notes Summary of TP 5589E/CIGGT 83-13, "Electric Locomotive Evaluation"	16. TDC Project Officer C.A. Versailles

17. Abstract

Using a train simulation model, the effects of power and tractive effort on train time and energy consumption are evaluated for the range of values typical in available electric locomotives. From this informaton base, extrapolations provide target values for future development. Design requirements such as axle power, overload capacity, traction-motor gear ratio and number of axles are discussed. Models of several different power-conditioning units are developed and used in evaluating measures of performance such as harmonic content, efficiency and power factor. The influence of these factors on the fixed cost of electrification is discussed and in some cases quantified.

18. Key Words	19. Distribution Statement
Electric locomotives; Power-conditioning units; Railway electrification	Available on request from TDC

20. Security Classification (of this report)	21. Security Classification (of this page)	22. No. of Pages	23. Price
unclassified	unclassified	15	

TDC CDT 79-005

FORMULE DE DOCUMENTATION POUR RAPPORT

1. N° du rapport Transports Canada	2. N° de l'étude — CDT	3. N° de catalogue du destinataire
TP 5588E	4888	

4. Titre et sous-titre	5. Date du rapport
ELECTRIC LOCOMOTIVE EVALUATION EXECUTIVE SUMMARY	Mars 1984
	6. N° du rapport de l'organisme exécutant 83-13(S)
7. Auteur(s) E.R. Corneil, G.W. English, H. Boumeester	8. N° de dossier Transports Canada D1465-317-5
9. Nom et adresse de l'organisme exécutant Canadian Institute of Guided Ground Transport (CIGGT) c/o Queen's University Kingston, Ontario K7L 3N6	10. N° de dossier — ASC 48SZ.T8200-2-2562
	11. N° de contrat — ASC ou Transports Canada OSZ 82-00098
12. Nom et adresse de l'organisme parrain Centre de développement des transports (CDT) 1000, rue Sherbrooke ouest Bureau 2421 Montréal (Québec) H3A 2R3	13. Genre de rapport et période visée 02/83 - 05/84
	14. Code de l'organisme parrain
15. Remarques additionnelles Sommaire de TP 5589E/CIGGT 83-13, "Electric Locomotive Evaluation"	16. Agent de projet — CDT C.A. Versailles

17. Resume

Ce rapport rend compte des résultats d'une étude par modélisation de la marche des trains, dans laquelle il s'agissait de déterminer l'effet de différents niveaux de puissance par essieu et d'effort de traction sur les temps de parcours et la consommation énergétique, dans la gamme des valeurs types propres aux locomotives électriques courantes. A partir de cette information de base, des extrapolations ont pu être faites pour situer les valeurs-cibles dans l'étude des nouvelles générations de locomotives. Le rapport traite de certains paramètres de base tels que: puissance à l'essieu, capacité de surcharge, rapport d'engrenages des moteurs de traction et nombre d'essieux. Il présente les modèles mathématiques élaborés pour simuler plusieurs groupes de conversion d'énergie qui ont servi à définir les critères à prendre en compte pour mesurer les performances comme: teneur en harmoniques, rendement et facteur de puissance, par exemple. Le rapport traite de l'influence de ces paramètres sur le coût de premier établissement, donnant certains cas chiffrés.

18 Mots-clés	19 Diffusion
Locomotives électriques. Groupes de conversion d'énergie. Electrification des chemins de fer	Ce rapport est distribué sur demande adressée au CDT

20. Classification de sécurité (de ce rapport)	21. Classification de sécurité (de cette page)	22. Nombre de pages	23. Prix
non-classifié	non-classifiée	15	

CDT/TDC 79-005

EXECUTIVE SUMMARY

1. INTRODUCTION

At present, 38 per cent of all European railways and more than ten per cent of the world's rail lines are electrified. In Canada, both Canadian National and Canadian Pacific have maintained an interest in electrification, but they have adopted the wait-and-see attitude common to most North American railroads. Both CN and CP have made studies of electrification (CP as early as 1895) and have continued to update them. In general, they have found that while there are cost savings, these savings are not sufficiently high to justify commercial interest in conversion. On the other hand, the British Columbia Railway has electrified its new Tumbler Ridge branch line. Also, there has been sufficient interest to warrant the formation of the Railway Electrification Committee (REC) in October 1981 to assess electrification in the Canadian context.

Supply of electric locomotives is the largest single cost item in electrification, although this fact is mitigated by the concurrent savings in diesel electric locomotives. It would be important to realize a high domestic content for new electric locomotives if electrification were to proceed. North American conditions are different (in both train configuration and terrain) from the majority of electrified rail operations. Also, there would be an opportunity to design the electric locomotive as part of the complete electrified system without the constraints of an existing electric infrastructure.

Basically, railway electrification involves the replacement of a portable power source (the diesel engine) with a fixed off-line generating station. Diesel-electric locomotives are limited, by the present technology of the diesel engine, to approximately 2,700 tractive kilowatts (3,600 horsepower). This power may be delivered to either four or six traction motors, without exceeding axle loads commonly accepted by North American railways. Higher-powered diesel engines, suitable for locomotive applications, have been produced, but high weight and poor reliability have thus far prevented widespread acceptance. Diesel-electric locomotives are in service with up to 560 tractive kilowatts (750 horsepower) per axle, although the majority of units operate at

373 to 448 tractive kilowatts (500 to 600 horsepower) per axle. The possibility of manufacturing acceptable electric locomotives producing substantially more power per axle does exist.

The objectives of this study are to identify and discuss the design trade-offs involved in selecting an electric locomotive for Canadian conditions. The effect of power-per-axle on efficiency and performance, power-conditioning unit design on fixed facilities costs, and the trade-offs associated with wheel size, adhesion and gear size in particular are addressed.

2. THE APPROACH

To obtain credible estimates of the effects of increased axle power, it was necessary to simulate realistic train configurations, over existing track profiles, with existing speed and siding constraints. The number of track segments examined was limited to a sample of 13 subdivisions covering a total route length of 4,288 kilometres.

Three major types of trains were considered: box car (mixed freight), bulk car (coal or grain), and TOFC (express with automotive cars, and trailer and container flatcars). The controlling grade for each segment, and for the trackage between major freight terminals which included the segment, was identified. The design criterion for trailing tonnage per locomotive axle was based on both sufficient adhesion ($\mu = 0.25$ was used) and sufficient power to maintain 20 km/h (12 mph) on the controlling grade.

For each train configuration, TPC calculations were performed for an axle power of 485 kilowatts (650 horsepower) per axle and for 970 kilowatts (1,300 horsepower) per axle. The 970 kilowatts-per-axle figure was identified as the maximum available with existing traction motors and the lower figure was chosen to provide a factor of two in the power equations. Also, the 485 kilowatts power per axle lay between the two common values for diesel locomotives.

3. POWER PER AXLE

The identification of the minimum cost power level is beyond the scope of this study. However, the relevant cost trade-offs have been iden-

tified and it is clear that the cost structure under electric operation is such that the minimum cost power level will be higher than it is for diesel-electric locomotives.

Once the power-conditioning unit and traction motors are designed for the current-carrying capacity necessary to achieve the low-speed tractive effort, the marginal cost of attaining powers higher than those of diesel-electrics is very low. However, there are other cost factors which must be considered. Energy and track maintenance and power distribution costs would increase. Offsetting this, track, rolling stock and locomotive utilization would increase, thereby lowering the associated investment costs.

On the basis of the sampling of performance effects, the following observations can be made:

(a) Increasing the axle power to values greater than those currently available on diesel-electric six-axle locomotives would increase train speed and reduce train time for 89 to 93 per cent of the traffic.

(b) Increased train speed would result in increased specific fuel consumption but the energy penalty versus speed increase is dependent on both segment direction and train type.

(c) As axle power increases, the train time for different types of trains, and for different power per unit mass values, decreases and becomes more uniform. The uniformity in train speed significantly reduces train delays caused by train interference. The reduction in train time and the more uniform operation increases track capacity.

(d) In cases where trains are dispatched on a power basis, increased axle power would permit a reduction in the number of locomotives required.

(e) The impact of power increases on substation costs would be small for the "low-speed train on steep gradient" case and significant for the "high-speed train on level track" case. In either case, the impact would be less than that

of a change in kVA brought about by displacement factor changes.

The effect of increasing power levels on wayside power supply costs can be mitigated by dispatcher control. If a number of trains are on an electrical segment simultaneously, there is a possibility of high peak system demands resulting from high demands of several trains occurring at the same time. A central control capability (either by radio link to the engineman, or carrier link to on-board control equipment) can substantially reduce peak system demands with relatively slight impact on train performance. A reduction in power demand, for locomotives in non-critical areas of the segment, would have little impact on train speed, and would often go unnoticed by train personnel. The ability to limit peak system demand would result in lower fixed plant costs and in lower electric demand charges.

The South African Railways reduced their demand charge on their Sishen-Saldanha line from 53 MW to 42 MW while increasing the round-trip time performance (presumably cycle time) by only 1.3 per cent. This was done by a combination of selective power restrictions, speed limits and departure delays on their scheduled operation. A demand monitoring system which forecasts demand levels for each demand integrating period (10 to 30 minutes) and alerts the dispatcher if the target peak is to be exceeded, provides immediate response to unscheduled operations.

The provision of a short-term overload capability involves a different set of trade-offs. As long as track conditions are such that peak locomotive power is required for relatively short periods, the overload capacity can be useful. However, the electronic equipment used to control the electric flow will not have an overload capability, and hence must be designed to handle the peak current values on a continuous basis. This makes the locomotive more expensive, necessitating proper cost-benefit analysis. Of the track segments sampled, both favourable and unfavourable duty cycles were encountered. An overload capability will not be as important in Canadian freight applications as it is in European passenger applications (where overload power is used frequently to accelerate to cruise speeds).

The transformer and traction motors have a substantial heat capacity, and hence an overload situation may be tolerated for some period of

time. However, operation for long periods at full load or overload condition will reduce the insulation life. Hence, the life of components in the traction system will be reduced by operation under overload conditions.

While the determination of an economic optimal power per axle was beyond the scope of the study, the upper design bounds were identified for both overload and continuous power ratings. To obtain the maximum overload capacity required, the tractive force and the tractive power required to maintain the track speed, on the maximum grade for that speed and track segment, were computed. To place a maximum bound on the continuous power rating, estimates were made of the power required to achieve the minimum feasible run time for the track segment, as governed by track speed limits. The estimates were made with a simplified exponential model, which was fitted to two TPC simulation data values for each train/track segment combination.

To identify the importance of each level of axle power, traffic estimates for each segment were converted to the number of locomotive axles required to haul the traffic over the segment. The axle trips were then multiplied by the segment length (to obtain, essentially, locomotive-kilometres per year). The percentage of the total axle-kilometres for overload and continuous axle powers are plotted in Figures 1 and 2, respectively, to illustrate the importance of each axle power level.

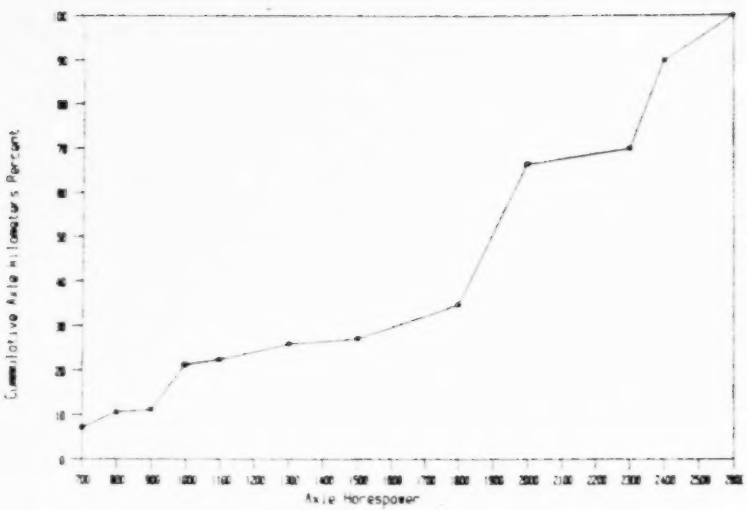
Figure 1 indicates that a maximum usable overload rating for axle power of 1,530 kilowatts (2,050 horsepower) would satisfy 66 per cent of the applications. Figure 2 indicates that an upper bound for the continuous rating of 1,150 kW (1,540 hp) would be usable for 67.5 per cent of the traffic.[1]

4. FOUR-, SIX- OR EIGHT-AXLE UNITS?

The 3,000 hp, six-axle locomotive is the principal power unit in North American mainline service. However, 3,000 hp on four axles is used in areas where adhesion is not a limiting factor, and a lesser number

---

1 Note that axle power is directly related to adhesion. Therefore, if the useful adhesion at track speed is only 0.20, the axle power must be reduced proportionately (to 80 per cent of the above figures).



Note that the axle-km figure is a product of subdivision length and the maximum power that could be utilized at some point on that subdivision.

Figure 1 Per cent of axle-kilometres vs maximum axle power which might be used on the track segment

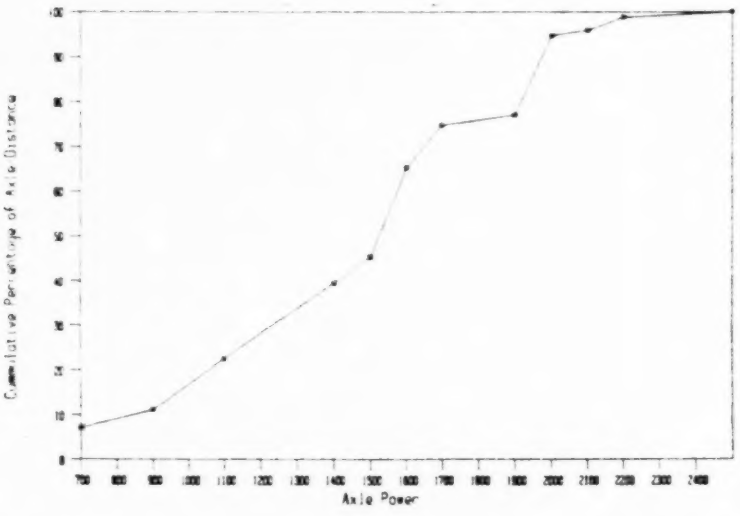


Figure 2 Maximum usable power estimates on a minimum-run-time criterion

of 2,000 hp (and lower) power units are utilized in mixed freight service to more closely match available power to train tonnages. Standardization of motive power to reduce maintenance inventories and manpower training is an important factor in present motive power decisions.

Electric operation would introduce a different set of cost sensitivities to the motive power decision. Under diesel operation, the initial purchase cost and maintenance costs associated with traction motors are reduced by applying the 3,000 horsepower available power to four axles rather than six when adhesion is not a constraint. Under electric operation, where available power is not a constraint, economies of scale would be realized through the purchase of a single unit with 50 per cent more power on six axles rather than a four-axle unit. The limiting factor in electric operation is the flexibility lost with the increasing size of individual power units. In areas of mixed freight operation, it may be desirable to forego some economies of scale and the maintenance advantages of unit standardization, and standardize instead on the power per axle and the type of power-conditioning equipment used, while having both four- and six-axle units available.

In addition to flexibility and economy of scale considerations, the question concerning the number of axles per locomotive unit depends on the following technical factors:

- tractive effort and power required for trains
- power transmitted through a locomotive pantograph
- locomotive weight considerations
- locomotive reliability considerations.

An analysis of the trains used for the TPC calculations, in conjunction with projected traffic levels, provided some information concerning the importance of four- or six-axle units.

For 10 per cent of the traffic, a single four-axle locomotive would be sufficient to haul the train. For 11 per cent of the traffic, a single six-axle locomotive would be sufficient. For 62 per cent of the traffic, there would be no significant advantage in having four- or

six-axle locomotives, for adhesion purposes, assuming that either unit could achieve the same adhesion value. An eight-axle locomotive could be utilized for 63 per cent of the traffic.

A locomotive pantograph must maintain contact between the carbon contact strips of the pantograph and the overhead contact wire, with a minimum loss of contact caused by wire bounce, etc. Freight locomotive speeds are not considered high, and the identified track speed limits indicate that fairly heavy pantographs could be used.

Typically, a pantograph carries two contact strips, with a total current rating of 200 amperes if long life is required. A higher current rating (up to 200 amperes per contact strip) can be tolerated if reduced wear life is acceptable. For a 50 kV nominal supply voltage, the locomotive should be able to produce full power at a supply voltage of 40 kV. Thus, a pantograph could be rated at 8,000 kVA, or up to 16,000 kVA if reduced wear life is acceptable (e.g. in overload). Thus, the pantograph power capacity does not appear to be a constraint on the number of axles, with a nominal 50 kV supply.

Discussions with manufacturers indicate that an electric locomotive could be built to provide 6,160 to 6,560 hp in a four-axle unit meeting North American standards if suitable traction motors could be obtained. Ballasting would be required to provide the required axle loads with six- or eight-axle units.

Unit reliability will decrease as the number of components increases. Thus, an eight-axle locomotive would have a higher reliability than two four-axle locomotives providing the same tractive capacity. However, the impact of a unit failure on trains using a single locomotive is sufficiently severe that North American railways will rarely dispatch a train with fewer than two locomotives. A single eight-axle locomotive could handle 21 per cent of the traffic. This relatively high percentage of possible single locomotive trains suggests that the railways will favour four- or six-axle locomotives unless electric locomotives are sufficiently more reliable than diesels.

5. GEAR DESIGN AND ADHESION IMPLICATIONS

The traction force that a given traction motor can deliver is directly proportional to the gear ratio and inversely proportional to the wheel radius, while the maximum motor rpm, the gear ratio, and the wheel diameter will establish the maximum track speed of the locomotive. As an example, the electric locomotives for the Tumbler Ridge unit coal train operation are designed for a top speed of 90 km/h (56 mph). With a track speed of 56 km/h (35 mph), the use of an even higher gear ratio, which would further increase the tractive force while lowering the top speed, would be desirable. However, there are physical constraints.

A high gear ratio requires a relatively small gear, with few teeth, on the traction motor shaft, and a relatively large gear on the locomotive axle. The traction wheel diameter limits the diameter of the gear mounted on the axle. Clearance between the rail head and the gear housing is essential if the locomotive is to traverse switches and cross-overs without damaging the gear housing.

The pinion gear, of small diameter, will have a relatively small number of teeth. Because each tooth will engage more frequently to carry the load, the wear and fatigue criteria for the pinion gear are more critical. An evaluation of wear life reveals that a 15-tooth pinion will have a wear life (in kilometres) only 48 per cent of that of a 17-tooth pinion, whereas a 19-tooth pinion will have a wear life twice as long as a 17-tooth pinion. Increasing the wheel diameter without changing the gear ratio will modify the gear factors sufficiently to provide a 10 per cent improvement in wear life.

As traction motor power output increases, the design and manufacture of the gear system will become more critical. For freight locomotives, wheel diameter and gear pinion life will limit the maximum tractive effort, and consequently the maximum locomotive speed.

A traction system designed to provide a maximum locomotive speed of not less than 110 km/h (65 mph) and a tractive effort capacity which requires an adhesion in excess of 30 per cent, for North American axle loads, is unlikely to provide a satisfactory wear life.

The effects on wheel and rail wear of increased adhesion levels at heavy axle loads was also evaluated. For 33-ton axle loads on 42-inch diameter wheels and standard carbon steel rails, it was estimated that continuous plastic deformation would occur for traction coefficients greater than 20 per cent. To alleviate these problems would require the use of heat-treated steel rail (permitting 50 per cent adhesions) or larger diameter wheels (permitting 28 per cent adhesion with 54-inch wheels).

As for gear tooth life, the economics of high adhesion are tied to the expected duty cycle. The increased wear effects may be acceptable if peak adhesion is only required on a short controlling grade, whereas these effects may be unacceptable in a service which requires frequent utilization of the available adhesion. A detailed economic evaluation considering the relative costs and the relevant duty cycles is required.

6. ELECTRIFICATION FIXED COST IMPLICATIONS

The effects of locomotive design on electrification fixed costs were investigated. The principal factors influencing external costs are efficiency, power factor and harmonic content. Efficiency (the ratio of input power to output power) has obvious implications for energy costs; power factor (the ratio of real power input to total volts-amperes input) has direct implications for line voltage drop and thus for substation spacing; and harmonic content (the number and magnitude of higher frequencies generated) influences both the power distribution costs because of voltage distortion and overvoltages, and compatibility costs of wayside voice frequency communications lines.

It is the total 60 Hz current which determines the fundamental voltage drop over the overhead contact system (OCS) between the supply point and the locomotive. An improvement in the ratio of the real to total 60 Hz current (the displacement factor) will thereby reduce voltage drop per unit length of OCS and thus permit longer substation spacings. A sensitivity evaluation was undertaken for estimated train load conditions in a Canadian mountain region to estimate the value of improving this ratio.

Investments in the locomotive to improve its displacement factor result in savings in both capital and operating costs of an electrified railway. The capital costs of substations and associated high voltage feed lines are reduced through a reduction in the number of feed points required. The operating saving relates to the "demand" charge which the utilities impose monthly for each substation, on the basis of the highest volts-ampere power demand at that substation. The estimated savings are shown in Table 1.

TABLE 1

COST IMPACTS OF LOCOMOTIVE DISPLACEMENT FACTOR
($000/km)

Displacement Factor	First Cost of Substations and Utility Feed Lines	Present Value of Demand Charge for First Thirty Operating Years kW billing (kVA billing)	Total
0.7	62.0	192/(275)	254.0/(337.0)
0.8	48.5	173/(216)	221.5/(264.5)
0.9	36.7	151/(168)	187.7/(204.7)
1.0	24.4	145/(145)	169.4/(169.4)
0.96 leading	18.0	128/(133)	146.0/(151.0)

The present value of improving the displacement factor from 0.8 to 0.9 would be $33,800/km, while a shift from 0.8 to 0.96 leading would have a present value of $75,500/km.

For typical motive power requirements, this represents about 10 to 20 per cent of the present North American price for a 6,000 hp electric locomotive.

The problems of current-carrying capacity relate to total power factor rather than just the displacement factor. Locomotives which demonstrate a 0.73 power factor would incur incremental costs of $13,000 per km in comparison with locomotives which achieve a 0.9 power factor.

The external costs of harmonic currents were evaluated in a more qualitative fashion. Harmonic currents affect the costs of electrification in two areas -- the power distribution system and wayside communication system.

The problems introduced to the power distribution system arise from harmonics of higher magnitude (usually the 3rd, 5th and 7th harmonics) which distort the fundamental frequency sine wave. Also, with longer feeding distances, the resonant frequency of the feed line decreases and the possibility of resonant voltage oscillations increases. Both forms of distortion lead to much higher peak voltages on the feed line. This has implications for insulation requirements, air gap clearances required in tunnels and under bridges, and protection of the locomotive solid-state equipment. Many factors which would characterize Canadian railway electrification would accentuate these problems in comparison to the conditions prevalent in European electrification.

Noise induction into voice frequency communications lines is another problem created by harmonic currents on the OCS. This problem arise principally from harmonics in the voice frequency range. Harmonics of very small magnitudes can be a problem because the effects are cumulative over a wide frequency range and the signal strength on the affected conductors is usually low.

The cost of achieving compatibility with communications circuits has been estimated to be from $10,000 to $27,000 per km of electrification. However, there are mitigating circumstances when considering the effects of voice frequency harmonics on these costs. First, if voice frequency harmonics are eliminated, there may still be electromagnetic compatibility costs associated with the 60 Hz current. The induced voltage from the fundamental current flow, if not mitigated, can create safety hazards. Second, the addition of harmonics from separate sources is not arithmetic. Slight differences in the phase relationship of the fundamental frequency can significantly reduce the vector sum of higher harmonics.

Questions remain to be answered regarding addition of harmonics from multiple sources and whether it is more cost-effective to reduce

harmonics on board the locomotive or through wayside filter installations.

The characteristics of five different power-conditioning units (PCUs) representative of those available in Europe and North America were predicted by computer simulation. Weighted average performance measures were generated for each of the PCUs in a computer simulation of a loaded bulk train traversing an 800 km mountain segment. The results are shown in Table 2. Each simulation was run both with filtering at the front end on board the locomotive and without filtering. Fixed value filters common to most existing electric locomotives were used. A broad band RC filter was used for the pulse-width modulated (PWM) case, while tuned 3rd harmonic filters were used for all other filtered cases.

TABLE 2

AVERAGE PERFORMANCE RESULTS FOR AN 800 KM MOUNTAIN REGION TRAIN RUN

Type of PCU	Three-bridge Phase Control		Two-bridge Phase Control		Two-bridge Symmetric Control		ac-dc Pulse Width Modulated PWM		ac-dc-dc Rectifier-Chopper	
Type of Motor	Series Motor		Shunt Motor		Shunt Motor		Shunt Motor		Shunt Motor	
Front-end filter	no	yes	no	yes	no	yes	no	yes	no	yes
Efficiency	.857	.73	.85	.74	.84	.73	.81	.66	.84	.74
TIF * I_{rms} (thousands)	35.5	29	41	33.6	40.3	33.5	187	49.2	59	47.4
kVA/kW (1/ph)	1.16	1.24	1.08	1.36	1.03	1.45	1.29	1.51	1.07	2.4
HF	.34	.153	.30	.12	.20	.07	.50	.06	.34	.08

The particular line had speed restrictions which resulted in an average train speed of 51 km/h. The majority of the trip was spent at 50 km/h, while the maximum speed reached was 88 km/h.

The efficiency variations across PCUs, with the exception of the pulse-width modulated unit, are not significant. The PWM unit has higher bridge commutation losses. The efficiency costs of constant filtering in this application are evident. At the lower speed and low power requirement on this line, the fixed value filters overcompensate the lagging displacement factor of all PCUs, leading to a substantial drop in efficiencies. While the filters are effective in reducing harmonic content (HF and $TIF*I_{rms}$), the VA/kW ratio increased in all cases.

This situation is particularly troublesome for the PWM unit which requires a large on-board capacitor to provide the commutating current for its fast switching SCRs. In the other units, a range of controlled filters could be used to achieve a suitable level of 60 Hz compensation. Harmonic reduction effectiveness would be reduced and additional space, complexity and first costs incurred, but displacement factor and efficiency should improve.

In terms of overall performance in this particular application, the unfiltered symmetrical control PCU may have some advantage. Its kVA/kW ratio and HF are both comparatively low. However, it demonstrates a slightly lower efficiency and a higher voice frequency harmonic content. A detailed economic evaluation to determine the most cost-effective PCU was beyond the scope of the present study.

7. CONCLUSIONS

(1) A simple, relatively accurate model has been developed relating power per unit train mass and train time. The relation is very sensitive to track features, making it necessary to calibrate the relation for each track segment. It is less sensitive to train characteristics, although errors of up to six per cent have been noted because of train variations. For the track segments sampled, a locomotive with a short-term overload rating of 1,530 kW and continuous rating of 1,150 kW would satisfy the maximum performance demands of 66 per cent of the traffic.

(2) The overload capability for an electric locomotive can provide performance equivalent to a higher powered unit if track characteristics permit. On some segments (e.g. BICSWN), overload capability will provide no benefit, while on others the benefit may be considerable.

(3) Careful design is necessary to provide an overload capability without serious consequences on locomotive reliability and life. This overload effect must be considered in the design of all components, from the pantograph down to the traction wheels.

(4) Adhesion levels have serious implications on wheel and rail wear and on gear design. Larger driving wheels permit higher adhesion levels. Reduced axle weight also permits higher adhesion levels, although the resulting drawbar force may not change appreciably.

(5) As axle power increases, gear wear is likely to become increasingly important. Envelope restrictions prevent physical modifications which could improve gear life. Gear design (single reduction) prohibits increasing the gear ratio to achieve high power and high adhesion.

(6) It is likely that railways will opt for a four- or six-axle locomotive, in preference to an eight-axle unit. The increased flexibility of dispatch, and the perceived improvement in train reliability achieved by the use of multiple locomotives is likely to outweigh arguments concerning reduced capital cost of the fleet, and possible improvements in unit reliability. The relatively small portion of the traffic which might be dispatched with a single locomotive, pantograph considerations, and unit/weight considerations are sufficiently indecisive that we are unable to indicate a clear choice for a four- or six-axle unit.

(7) The analysis of power-conditioning units again presents no clear direction on the choice of system, since track characteristics will favour one type on one segment and another type on another segment. However, it is clear that active filtering is preferable to simpler forms, because of the wide range of operating conditions.

(8) A suitable choice of power-conditioning unit can provide substantial savings in the supply system. The benefits of reduction of the reactive power requirements of the locomotive are significant. A detailed economic evaluation of the relative costs and benefits of forced commutation, on-board and wayside filtering, and power factor corrections should be undertaken.

Transports Canada
Développement

Transport Canada
Development

TP 5588F

Évaluation de locomotives électriques

Rapport sommaire

Préparé pour le
Centre de développement
des transports
Transports Canada

MARS 1984

CA2 ON
UQU 325
83
R13SZ
c.2

Canada

CIGGT Project No. PRO-145

CIGGT Report No. 83-13(S)
Transport Canada Report No. TP 5588F

ÉVALUATION DE LOCOMOTIVES ÉLECTRIQUES
RAPPORT SOMMAIRE

E.R. Corneil
G.W. English
H. Boumeester

Fait pour le compte du

Centre de développement des transports, Transports Canada

Canadian Institute of Guided Ground Transport
Queen's University at Kingston, Ontario
K7L 3N6

Mars 1984

Le présent rapport concerne la recherche faite par le Canadian Institute of Guided Ground Transport. Il fait état des opinions des auteurs, qui ne sont pas nécessairement celles de l'Université ou des autres organismes participants.

This summary also available in English.

FORMULE DE DOCUMENTATION POUR RAPPORT

1 N° du rapport Transports Canada	2 N° de l'étude — CDT	3 N° de catalogue du destinataire
TP 5588F	4888	

4 Titre et sous-titre	5 Date du rapport
ÉVALUATION DE LOCOMOTIVES ÉLECTRIQUES RAPPORT SOMMAIRE	Mars 1984
	6 N° du rapport de l'organisme exécutant 83-13(S)
7 Auteur(s) E.R. Corneil, G.W. English, H. Boumeester	8 N° de dossier Transports Canada D1465-317-5
9 Nom et adresse de l'organisme exécutant Canadian Institute of Guided Ground Transport (CIGGT) c/o Queen's University Kingston, Ontario K7L 3N6	10 N° de dossier — ASC 48SZ.T8200-2-2562
	11 N° de contrat — ASC ou Transports Canada OSZ 82-00098
12 Nom et adresse de l'organisme parrain Centre de développement des transports (CDT) 1000, rue Sherbrooke ouest Bureau 2421 Montréal (Québec) H3A 2R3	13 Genre de rapport et période visée 02/83 - 05/84
	14 Code de l'organisme parrain
15 Remarques additionnelles Sommaire de TP 5589E/CIGGT 83-13, "Electric Locomotive Evaluation"	16 Agent de projet — CDT C.A. Versailles

17 Resume

Ce rapport rend compte des résultats d'une étude par modélisation de la marche des trains, dans laquelle il s'agissait de déterminer l'effet de différents niveaux de puissance par essieu et d'effort de traction sur les temps de parcours et la consommation énergétique, dans la gamme des valeurs types propres aux locomotives électriques courantes. A partir de cette information de base, des extrapolations ont pu être faites pour situer les valeurs-cibles dans l'étude des nouvelles générations de locomotives. Le rapport traite de certains paramètres de base tels que: puissance à l'essieu, capacité de surcharge, rapport d'engrenages des moteurs de traction et nombre d'essieux. Il présente les modèles mathématiques élaborés pour simuler plusieurs groupes de conversion d'énergie qui ont servi à définir les critères à prendre en compte pour mesurer les performances comme: teneur en harmoniques, rendement et facteur de puissance, par exemple. Le rapport traite de l'influence de ces paramètres sur le coût de premier établissement, donnant certains cas chiffrés.

18 Mots-clés	19 Diffusion
Locomotives électriques. Groupes de conversion d'énergie. Electrification des chemins de fer	**Ce rapport est distribué sur demande adressée au CDT**

20 Classification de sécurité (de ce rapport)	21 Classification de sécurité (de cette page)	22 Nombre de pages	23 Prix
non-classifié	non-classifiée	17	

CDT/TDC 79-005

REPORT DOCUMENTATION FORM

1. Transport Canada Report No.	2. TDC Project No.	3. Recipient's Catalogue No.
TP 5588F	4888	

4. Title and Subtitle	5. Report Date
ÉVALUATION DE LOCOMOTIVES ÉLECTRIQUES RAPPORT SOMMAIRE	March 1984
	6. Performing Organization Report No. 83-13(S)
7. Author(s) E.R. Corneil, G.W. English, H. Boumeester	8. Transport Canada File No. D1465-317-5
9. Performing Organization Name and Address Canadian Institute of Guided Ground Transport (CIGGT) c/o Queen's University Kingston, Ontario K7L 3N6	10. DSS File No. 48SZ.T8200-2-2562
	11. DSS or Transport Canada Contract No. OSZ 82-00098
12. Sponsoring Agency Name and Address Transportation Development Centre (TDC) 1000 Sherbrooke Street West, Suite 2421 Montreal, Quebec H3A 2R3	13. Type of Report and Period Covered 02/83-03/84
	14. Sponsoring Agency Code
15. Supplementary Notes Summary of TP 5589E/CIGGT 83-13, "Electric Locomotive Evaluation"	16. TDC Project Officer C.A. Versailles

17. Abstract

Using a train simulation model, the effects of power and tractive effort on train time and energy consumption are evaluated for the range of values typical in available electric locomotives. From this informaton base, extrapolations provide target values for future development. Design requirements such as axle power, overload capacity, traction-motor gear ratio and number of axles are discussed. Models of several different power-conditioning units are developed and used in evaluating measures of performance such as harmonic content, efficiency and power factor. The influence of these factors on the fixed cost of electrification is discussed and in some cases quantified.

18. Key Words	19. Distribution Statement
Electric locomotives; Power-conditioning units; Railway electrification	Available on request from TDC

20. Security Classification (of this report)	21. Security Classification (of this page)	22. No. of Pages	23. Price
unclassified	unclassified	17	

TDC CDT 79-005

RAPPORT SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

Jusqu'à présent, 38 p. cent des chemins de fer européens et plus de 10 p. cent des chemins de fer dans le monde ont été électrifiés. Au Canada, le Canadien National et le Canadien Pacifique, intéressés tous deux à l'électrification, ont préféré adopter la politique attentiste qui caractérise les compagnies de chemins de fer d'Amérique du Nord. L'intérêt des deux compagnies canadiennes pour cette question ne s'est jamais démenti, le CP s'y intéressant, en effet, dupuis 1895. Leur constatation peut se résumer à ceci: l'électrification apporte des économies, certes, mais celles ne sont pas importantes au point de justifier une conversion globale. Par contre, la British Columbia Railway a électrifié le branchement de Tumbler Ridge, nouvellement construit. En outre, témoignage d'un intérêt croissant, le Comité sur l'électrification des chemins de fer a vu le jour en octobre 1981, sa tâche étant d'évaluer les avantages de l'électrification dans un contexte canadien.

Les locomotives électriques constituent le poste de dépense le plus important dans tout schéma d'électrification, mais, en contrepartie, il y a le fait que le nombre de locomotives diesel-électriques à acheter serait automatiquement moindre. Advenant la décision de procéder à l'électrification, il est important de s'assurer, dès le départ, d'un contenu canadien élevé dans le nouvelles locomotives électriques. Deux facteurs jouent en faveur de cette option: d'abord le contexte nord-américain qui est bien différent de la pluplart des autres contextes, du point de vue géographique et de la composition des trains, et ensuite la possibilité d'intégrer, en l'absence d'une infrastructure électrifiée contraignante, la conception des locomotives électriques et celle, plus globale, d'un réseau électrifié neuf.

Essentiellement, l'électrification consiste à remplacer une source d'énergie embarquée (le moteur diesel) par des installations de traction fixes. La technologie actuelle du moteur diesel ne permet pas de construire des locomotives diesel-électriques ayant une puissance de traction dépassant les 2 700 kilowatts, soit 3 600 Hp. Cette puissance peut être délivrée à quatre ou six moteurs de traction, tout en

respectant les charges à l'essieu généralement admises par les compagnies nord-américaines de chemin de fer. Des moteurs diesel plus puissants, convenant aux locomotives, ont éré fabriqués mais leur masse élevée et leur faible fiabilité ont fait que leur utilisation ne s'est jamais généralisée. On trouve des locomotives diesel-électriques capables d'une puissance de traction atteignant 560 kW (750 Hp) par essieu, mais la majorité développe une puissance comprise entre 373 et 448 kW (500 à 600 Hp). L'avantage donc de la traction électrique est de permettre des puissances à l'essieu beaucoup plus élevées que celles-ci.

L'étude s'est proposée de rechercher et d'approfondir les compromis à faire dans la sélection de locomotives électriques appropriées au contexte canadien. Elle a analysé l'influence de la puissance de traction par essieu sur le rendement et les performances, et celle des circuits de puissance sur le coût des installations fixes, en plus de cherche à déterminer les choix possibles au niveau de diamètre des roues, des coefficients d'adhérence et des rapports d'engrenage.

2. DÉMARCHE ADOPTEE

Afin de disposer de données fiables sur les conséquences de puissances de traction plus élevées, il a fallu simuler la marche de différentes configurations courantes de trains sur tracés connus et selon des sujétions de vitesse et de régulation du trafic conformes à la réalité. Un échantillonnage de 13 subdivisions a été retenu, représentant au total 4 288 kilomètres.

Trois configurations de trains ont été considérés: wagons couverts (fret mixte), wagons tombereaux (charbon ou grains) et R.S.W.P. (pour le transport de véhicules routiers, de remorques et de conteneurs). La rampe maximale a été déterminée à l'égard de chacun des tronçons étudiés et aussi à l'égard des lignes correspondantes reliant de grands centres de fret. Le critère et calcul relatif aux tonnages remorqués rapportés au nombre d'essieux de locomotives a été à la fois celui de l'adhérence (0,25) et de la puissance nécessaires pour donner au train une vitesse de 20 km/h (12 mi/h) sur la rampe maximale.

Pour chacune des configurations retenues, des calculs de performances ont été faits sur la base de 485 et de 970 kilowatts par essieu, soit 650 et 1 300 Hp, respectivement. La valeur de 970 a été reconnue comme étant la puissance maximum réalisable avec les moteurs de traction actuels, tandis que la valeur de 485 a été choisie parce qu'elle apporte un facteur de 1:2 dans les équations de puissance et parce qu'elle est comprise entre les puissances développées par les locomotives diesel d'utilisation courante.

3. PUISSANCE PAR ESSIEU

La détermination précise du niveau de puissance le plus économique n'entre par dans le mandat de la présente étude. Par contre, des divers scénarios financiers qui ont pu être dégagés, il s'avère que la structure des coûts à prévoir dans le cas de l'électrification est telle que ce niveau sera supérieur à celui des locomotives diesel-électriques.

Une fois qu'auront été dimensionnés les circuits de puissance et les moteurs de traction en fonction des intensités nécessaires pour développer l'effort de traction voulu au démarrage, il ne reviendra pas beaucoup plus cher de les pousser à des puissances dépassant celles des diesel-électriques. Mais ce ne sont pas là les seuls facteurs de coût à considérer. En effet, la facture énergétique, l'entretien de la voie et le coût des installations de distributon augmenteraient, alors que, les taux d'utilisation (voies de équipements), qui sont une fonction inverse des dépenses d'investissement, diminueraient, eux.

Des calculs de performances effectués, il est possible de tirer les conclusions suivantes:

(a) Un accroissement de la puissance par essieu à des valeurs supérieures à celles des locomotives diesel-électriques à 6 essieux d'utilisation courante permettra de hausser les vitesses pratiquées et de réduire les temps de parcours pour une proportion de 89 à 93 p. cent du trafic.

(b) L'accroissement des vitesses entraînera une augmentation de la consommation spécifique, mais le rapport de cette augmentation au gain de vitesse variera selon le sens de la marche et la composition des trains.

(c) A mesure que la puissance par essieu augmente, les temps de parcours baissent, quels que soient la configuration des trains et la puissance massique des moteurs, au point de devenir plus ou moins uniformes. Une telle uniformité dans les vitesses pratiquées réduirait considérablement les temps d'attente dus à des croisements ou des dépassements. Ensemble, la réduction des temps de parcours et la réduction des écarts de vitesses contribueraient à augmenter la capacité des réseaux.

(d) Dans le cas des trains expédiés sur tracés relativement plats où l'effort aux jantes n'est pas un facteur primordial, un accroissement de la puissance par essieu permettrait de réduire le nombre de locomotives attelées.

(e) L'accroissement des puissances par essieu produirait sur le coût des sous-stations un effet relativement faible dans le cas de trafics lents sur tracés à rampes raides, et relativement fort dans le cas des trafics rapides sur tracés en palier. Cet effet serait, en tout cas, moindre que celui procédant d'une amélioration du facteur de puissance produite par une amélioration du facteur de déphasage.

L'effet de l'accroissement de la puissance par essieu sur la facture d'électricité pourrait être atténué par une meilleure régulation du trafic. En effet, lorsqu'un certain nombre de trains occupent en même temps un tronçon électrifié donné, il peut en résulter un appel de puissance de crête élevé, somme des appels simultanés. Une centralisation de la commande des trains (par liaison radio avec le mécanicien ou commande d'un automatisme à bord) contribuerait à réduire sensiblement cette puissance de crête sans que la marche des trains ne s'en ressente de façon sensible. Une réduction de la puissance absorbée par les trains proches des sous-stations n'aura qu'une faible incidence sur la vitesse de ces trains et peut-être même aucun effet perceptible. Donc, la possibilité de maîtriser les appels de puissance de crête serait un moyen de réduire le coût des sous-stations et de baisser les primes de puissance.

Les chemins de fer sud-africains ont réussi à ramener la prime de puissance frappant leur ligne Sishen-Saldanha de 53 à 42 MW tout en n'augmentant les temps de parcours aller-retour que de 1,3 p. cent.

Pour cela, ils ont limité les puissances sur certains itinéraires, abaissé les vitesses de consigne et décalé certains départs. Ils ont mis en oeuvre un système de surveillance de la demande qui détermine les appels de puissance prévisibles sur une periode pouvant aller de 10 à 30 minutes et qui avertit le régulateur dès que la crête de puissance admissible risque d'être dépassée.

La question des surcharges admissibles de courte durée-fait intervenir des compromis bien différents. Dans la mesure où les conditions de trafic ne déterminent que des appels de puissance de crête de très courte durée, il peut être utile de disposer d'une capacité de surcharge. A remarquer cependant que l'appareillage électornique de commande ne pouvant fonctionner en surcharge, il devra être conçu en fonction de l'intensité de pointe prévisible. Cela a pour conséquence de rendre la locomotive plus onéreuse, d'où la nécessité d'une analyse coûts-avantages. Dans le cas des tronçons étudiés, des cycles de marche tant favorables que défavorables ont été constatés. Il n'est pas aussi important de prévoir une capacité de surcharge dans le cas du transport ferroviaire de marchandises au Canada qu'il ne l'est, en Europe, pour le transport de personnes où l'on exploite cette capacité pour la mise en vitesse des trains.

Les transformateurs et les moteurs de traction étant capables d'absorber des surcharges thermiques appréciables, il est possible de les faire fonctionner en surcharge pendant un certain laps de temps. Mais si le régime de pleine charge ou de surcharge devait perdurer, l'isolation en souffrirait, notamment au niveau des composants de traction dont la durée de vie utile serait alors raccourcie.

Alors que la détermination de la puissance par essieu optimale du point de vue économique n'entre pas dans le cadre de cette étude, il reste que les valeurs limites supérieures ont été établies pour les régimes tant de surcharge que continu. Pour dimensionner les circuits de surcharge à prévoir, il a fallu calculer la puissance de traction qui permettrait au train de maintenir la vitesse imposée par le programme de marche et l'effort aux jantes apte à lui faire franchir la rampe maximale correspondant à cette vitesse dans la section considérée. Pour ce qui est de la puissance nominale du régime continu, des calculs approchés ont été faits pour déterminer la puissance à mettre en oeuvre pour réaliser le temps de parcours minimum sur la section

considérée, compte tenu des vitesses définies pour cette section-là. Ces calculs ont pu être faits grâce à un modèle exponentiel simplifié pour lequel ont été utilisées deux valeurs théoriques pour chaque grandeur correspondant à une combinaison train-voie.

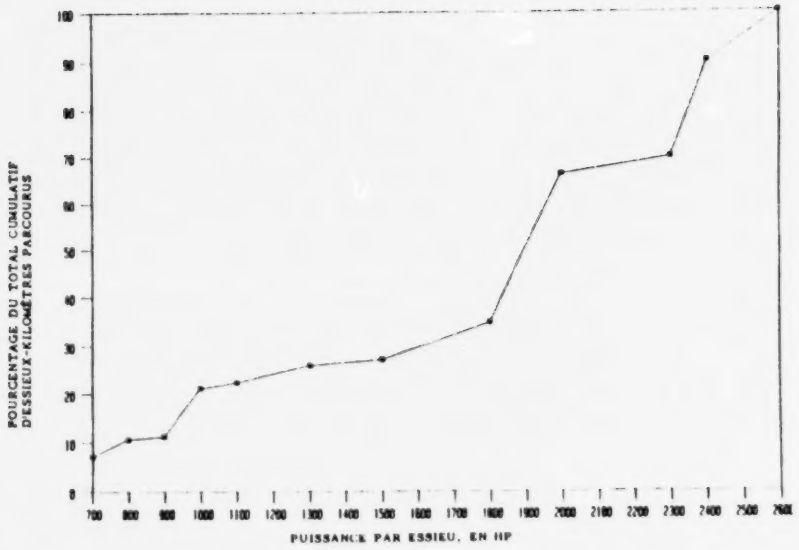
Pour connaître l'effet de chacun des niveaux de puissance par essieu envisagés, les densités de trafic prévues pour chacune des sections étudiées ont été converties en nombre d'essieux de locomotives qu'il faut pour transporter les charges considérées. Ce nombre d'essieux a ensuite été multiplié par la longueur de la section ou, plus précisément, le nombre de kilomètres parcourus par an. Les figures 1 et 2 donnent le rapport en pourcentage de la puissance par essieu absorbée en régime de surcharge et en régime continu au nombre total d'essieux-kilomètres.

La figure 1 montre qu'une puissance par essieu utile maximum de 1 530 kW (2 050 Hp) satisferait à 66 p. cent du trafic en régime de surcharge, alors que la figure 2 montre qu'en régime continu une valeur correspondante de 1 150 kW (1 540 Hp) suffirait dans une proportion de 67,5 p. cent. Mais la puissance par essieu est fonction de l'adhérence. Or, si le coefficient d'adhérence aux vitesses définies n'est que de 0,20, les puissances par essieu indiquées ci-dessus devront être proportionnellement réduites (à 80 p. cent des valeurs indiquées).

4. LOCOMOTIVES À 4, 6 OU 8 ESSIEUX

La locomotive 3 000 Hp 6 essieux est l'engin le plus couramment utilisé par les compagnies nord-américaines de chemins de fer. Là où l'adhérence ne constitue pas un facteur limitatif, elles utilisent les locomotives 3 000 Hp à 4 essieux. Plus rarement, des locomotives de 2 000 Hp et moins sont utilisées en service marchandises mixtes de manière à mieux accorder la puissance globale aux charges remorquées qui peuvent varier. La standardisation du matériel moteur dans le but de réduire les stocks nécessaires à l'entretien et de minimiser les dépenses consacrées à la formation du personnel entre pour une grande part dans les décisions concernant l'acquisition de ce matériel.

Or, l'électrification fera intervenir un ensembles de facteurs de sensibilité bien différents. Dans le cas des locomotives diesel, on



La valeur essieu-kilomètre est le produit de la longueur de la section par la puissance maximale devant être mise en oeuvre en un point donné de cette section.

Figure 1 Courbe du pourcentage d'essieux-kilomètres en fonction de la puissance par essieu maximale

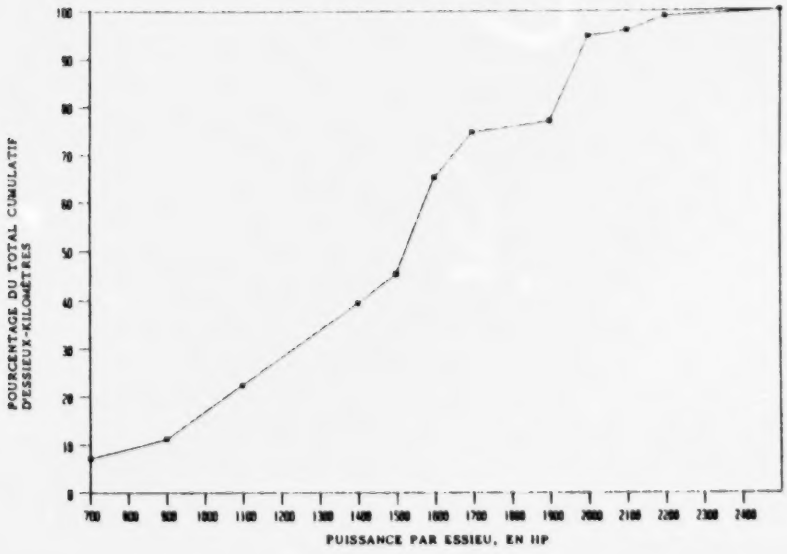


Figure 2 Puissances par essieu à mettre en oeuvre pour réduire au minimum le temps de parcours

baisse les coûts de premier établissement et d'entretien des moteurs de traction en établissement et d'entretien des moteurs de traction en expédiant des trains remorqués par des locomotives 3 000 Hp de quatre plutôt que de six essieux, lorsque l'adhérence ne constitue pas un facteur limitatif. Dans le cas des locomotives électriques, la puissance disponible n'étant pas un facteur limitatif, on réalisera des économies d'échelle en achetant des locomotives de six essieux et non de quatre, mais une fois et demie plus puissantes. Le facteur limitatif sera, dans ce cas, la perte de souplesse causée par des locomotives plus largement dimensionnées. Pour ce qui est du transport de marchandises mixte, il serait préférable d'abandonner l'idée des économies d'échelle et des réductions des coûts d'entretien, favorisée par la standardisaton du matériel moteur pour standardiser plutôt la puissance par essieu et les circuits de puissance utilisés, ce qui permettrait de disposer de locomotives ayant le nombre d'essieux voulu selon l'application considérée.

Outre la souplesse et les économies d'échelle, le critière concernant le nombre d'essieux par locomotive dépend des facteurs techniques suivants:

- effort aux jantes et puissance de traction
- puissance délivrée par le pantographe
- masse de la locomotive
- fiabilité générale de la locomotive.

L'analyse des trains utilisés pour établir les calculs de performances (voie annexe B) permet, à la lumière des prévisions de trafic, de répondre à la question concernant le nombre d'essieux par locomctive.

Une seule locomotive 4 essieux suffisait pour 10 p. cent du trafic; une de six essieux pour 11 p. cent; tandis que pour 62 p. cent du trafic il est pratiquement indifférent, du point de vue du critère de l'adhérence, d'utiliser des locomotives à 4 ou à 6 essieux, à condition que les deux types offrent un coefficient d'adhérence égal. Une locomotive à 8 essieux suffit pour 63 p. cent du trafic.

Le pantographe doit être capable de garder le contact entre les archets et le fil de contact aérien, tout en se ressentant le moins possible des oscillations de ce fil. Les vitesses pratiquées par les trains de marchandises n'étant pas élevées, et les vitesses de consigne sur les

lignes considérées étant ce qu'elles sont, les locomotives pourraient donc être équipées de pantographes relativement lourds.

Un pantographe comporte normalement deux archets d'une intensité nominale totale limitée à 200 ampères, si on vise une longue durée de vie utile. Si ce dernier critère n'est pas essentiel, des intensités plus fortes, jusqu'à concurrence de 200 ampères par archet, seraient admissibles. Dans le cas d'une alimentation à une tension nominale de 50 kV, une locomotive devrait pouvoir développer sa puissance maximale à une tension effective de 40 kV. Un pantographe devrait donc être conçu pour une puissance apparente de 8 000 kVA, ou bien jusqu'à concurrence de 16 000 kVA si on accepte des durées de vie réduites, en régime de surcharge, par exemple. Il semble donc que la puissance nominale des pantographes ne constitue pas un facteur limitatif quant au nombre d'essieux, lorsque la tnesion nominale d'alimentaion est de 50 kV.

D'après les fabricants de matériel roulant, il est possible de construire des locomotives électriques à 4 essieux ayant entre 6 160 et 6 560 Hp et satisfaisant aux normes nord-américaines, si les moteurs de traction correspondants peuvent être obtenus. Il faudrait prévoir un ballastage pour atteindre la charge par essieu prescrite, dans le cas des locomotives à 6 our 8 essieux.

Quant à la fiabilité, ce facteur est fonction inverse du nombre d'organes. Ainsi, à puissance de traction égale, la fiabilité d'une seule locomotive à 8 essieux serait supérieure à celle de deux locomtives 4 essieux. Cependant, la crainte des conséquences d'une défaillance frappant la seule locomotive du train est si forte que les sociétés ferroviaires nord-américaines n'expédient que rarement un train avec moins de deux locomotives. Une seule locomotive à 8 essieux peut convenir pour 21 p. cent du trafic. Malgré ce pourcentage aussi élevé, tout porte à croire que les compagnies de chemins préféreront opter pour des locomotives à 4 ou 6 essieux.

5. CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES ET D'ADHÉRENCE

L'effort aux jantes développé par un moteur est directement proportionnel au rapport d'engrenages de la transmission et inversement proportionnel au diamètre des roues. Tandis que la vitesse de rotation

maximum du moteur, le rapport d'engrenages et le diamètre des roues définissent, ensemble, la vitesse maximale de la locomotive. Les locomotives électriques utilisées pour la traction des trains-blocs charbonniers sur la ligne Tumbler Ridge ont été conçues pour une vitesse maximale de 90 km/h (56 mi/h). La vitesse imposée étant de 56 km/h (35 mi/h) sur cette ligne, il serait préférable d'avoir un rapport d'engrenages plus élevé, augmentant ainsi l'effort aux jantes disponible tout en réduisant la vitesse de pointe. Mais là, il y a des contraintes. En effet, pour avoir un rapport élevé, il faut une roue relativement petite, à nombre de dents peu élevé, sur l'arbre du moteur et une roue dentée relativement grande calée sur l'essieu de locomotive. Or, le diamètre de celle-ci est forcément limité par le diamètre de la roue montée sur l'arbre. En outre, il faut prévoir un dégagement entre le champignon du rail et le carter d'engrenages afin que la locomotive puisse franchir les appareils de voie sans encombre.

Le pignon moteur étant de faible diamètre, le nombre de dents qu'il comporte sera relativement petit. Donc, le nombre de contacts par dent sera d'autant plus élevé, faisant de l'usure et de la fatigue de ce pignon des facteurs limitatifs particulièrement contraignants. Une étude a montré qu'un pignon de 15 dents a une durée de vie (exprimée en kilomètres) de 48 p. cent seulement de celle d'un autre ayant 17 dents, et que celui-ci est deux fois moins durable qu'un à 19 dents. Si on augmente le diamètre des roues tout en gradant le rapport d'engrenages tel quel, on obtient une amélioration de la durée de vie de quelque 10 p. cent.

La conception et la réalisation de la chaîne cinématique deviennent de plus en plus critiques à mesure qu'augmentent les puissances de traction. Dans le cas des engins pour la traction des trains de marchandises, le diamètre des roues et la résistance du pignon imposeront une limite à l'effort aux jantes maximal et, par conséquent, à la vitesse maximale.

Une chaîne cinématique conçue pour une vitesse maximale d'au moins 110 km/h (65 mi/h) et un effort aux jantes tel qu'il nécessite un coefficient d'adhérence supérieur à 30 p. cent eu égard aux charges par essieu admises par les pratiques nord-américaines, n'aura probablement pas une durée de vie convenable.

L'effet sur l'usure roue-rail de coefficients d'adhérence élevés sous charges par essieu élevées a également été étudié. Il a été déterminé qu'un matériel ayant des routes de 42 pouces de diamètre, chargé à 33 tonnes par essieu et roulant sur des rails normalisés en acier au carbone provoquera une déformation plastique continue aux coefficients d'adhérence supérieurs à 20 p. cent. Pour prévenir cet état de choses, il faudrait des rails traités thermiquement autorisant un coefficient de 50 p. cent ou bien des roues de diamètre plus grand, par example des roues de 54 pouces autorisant un coefficient de 28 p. cent.

Comme dans le cas du pignon moteur, les facteurs technico-économiques associés à un coefficient élevé sont reliés au programme de marche défini. Le niveau d'usure pourrait être jugé acceptable si un coefficient élevé ne devait intervenir que sur une rampe de courte longueur, mais pas si ce régime devait perdurer. Une étude technico-économique devra être faite sur le rapport programme de marche-prix.

6. COÛT DES INSTALLATIONS FIXES

L'effet du type de locomotive choisi sur le coût des installations fixes a également été étudié. Les principaux facteurs en jeu sont le randement, le facteur de puissance et la teneur en harmoniques. Le rendement (rapport de la puissance utile à la puissance absorbée) a une influence évidente sur la facture énergétique. Le facteur de puissance (rapport de la puissance active à la puissance apparente globale) a une influence directe sur la chute de tension en ligne et, par conséquent, sur la distance économique entre sous-stations. Enfin, la teneur en harmoniques (nombre et amplitudes des courants à des fréquences multiples du fondamental) influe sur le réseau d'alimentation à cause des déformations de la tnesion d'alimentation et des surtensions, et aussi sur les fréquences de transmission qui ne doivent pas coincider avec la fréquence d'alimentation.

La chute de tension du courant fondamental due au pantographe et constatée entre le point de branchement et la locomotive est régie par la puissance apparente globale et l'onde fondamentale. Une amélioration du facteur de déphasage (rapport de la puissance active à la puissance apparente de l'onde fondamentale) réduira la chute de tension par unité

de longueur de la ligne de contact et, part conséquent, autorisera une plus grande distance entre sous-stations. Dans le but d'évaluer l'utilité d'une éventuelle amélioration de ce facteur, une étude de sensibilité a été faite par rapport aux charges à remorques prévisibles, dans le cas d'une ligne franchissant une région montagneuse du Canada.

Un amélioration du facteur de déphasage permettre de réduire les coûts de premier établissement et d'exploitation. Le coût de premier établissement baissera en rapport avec la réduction dans le nombre de points d'alimentations et le coût d'exploitation avec la baisse dans la prime de puissance qui est facturée mensuellement d'après la pointe de puissance absorbée par chacune des sous-stations. Les économies réalisables estimées figurent au tableau 1.

TABLEAU 1

INFLUENCE DU FACTEUR DE DÉPHASAGE SUR LES COÛTS
(en milliers de $ au km)

Facteur de déphasage	Coût de premier établissement des sous-stations et des artères d'alimentation	Valeur actualisée nette de la prime de puissance facturée au cours des 30 premières années, en kW (en kVA)	Total
0.7	62.0	192/(275)	254.0/(337.0)
0.8	48.5	173/(216)	221.5/(264.5)
0.9	36.7	151/(168)	187.7/(204.7)
1.0	24.4	145/(145)	169.4/(169.4)
0.9ɒ en avance	18.0	128/(133)	146.0/(151.0)

La valeur actualisée nette d'une amélioration résultant d'un facteur de déphasage porté de 0,8 à 0,9 est de 33 800 $ au kilomètre, et elle est de 75 500 $ au km si ce facteur est porté à 0,96 en avance.

Dans le cas d'une installation type, les économies réalisables représentent entre 10 et 20 p. cent du prix sur le marché nord-américain d'une locomotive électrique de 6 000 Hp.

Quant aux intensités admissibles, elles sont liées au facteur de puissance global et non pas seulement au facteur de déphasage. Une locomotive fonctionnant à un fp de 0,73 causera un surcoût de 13 000 $ au km par rapport à un autre ayant un fp de 0,9.

L'influence de la teneur en harmoniques sur le coût des installations fixes et été estimée de façon plutôt qualitative. Elle touche le réseaux d'alimentation et les circuits de transmission longeant la voie.

L'influence sur le réseau d'alimentation résulte des déformations de l'onde sinusoidale fondamentale par les harmoniques de plus grande amplitude (les 3^{e}, 5^{e} et 7^{e} harmoniques). Aussi, plus les distances d'alimentation sont grandes, plus la fréquence de résonance baisse et plus les risques de fluctuations de la tension par résonance seront élevés. Ces deux formes de déformation occasionnent des pointes de tension plus fortes dans les artères d'alimentation. Ces pointes influent sur les systèmes d'isolation à prévoir, sur les distances d'isolement dans le cas des tunnels et des passages inférieurs et sur les critères de protection des appareillages statiques de commande des locomotives. Plusieurs facteurs caractérisant le schéma d'électrification au Canada auraient tendance à aggraver tous ces problèmes, comparativement au schéma européen.

Les bruits induits par les harmoniques de courant dans les circuits de transmission téléphonique sont un autre problème a considérer. Il s'agit surtout des harmoniques dans la gamme des audiofréquences. Ceux d'amplitude très faible peuvent être gênants parce que leur effet est cumulatif sur un large éventail de fréquences et aussi parce que le rapport signal-bruit dans les conducteurs touchés est d'habitude faible.

Le coût de protection des circuits de transmission a été estimé entre 10 et 27 000 $ au km électrifié. Il est cependant d'autres considérations dont il faut tenir compte lorsqu'on apprécie l'influence des harmoniques à audiofréquence sur le coût des installations. Premièrement, une fois des harmoniques éliminées, il n'est pas dit qu'on ne devra-pas

consentir d'autres frais encore pour la protection du personnel contre les tensions induites par le courant fondamental 60 Hz. Deuxièmement, les harmoniques en question, de provenances diverses, ne s'additionnant pas arithmétiquement, il est possible (par une simple décalage par rapport à la fondamentale) de réduire sensiblement la somme vectorielle des harmoniques.

D'autres recherches restent à faire dans le domaine des harmoniques de provenances diverses, notamment pour savoir s'il est plus économique de les éliminer par des dispositifs embarqués ou fixés au sol.

Par une simulation assistés par ordinateur, il a été possible de figurer les caractéristiques de cinq circuits de puissance parmi les plus utilisés en Europe et en Amérique du Nord. Des valeurs moyennes pondérées ont pu être obtenues concernant les performances de ces circuits, dans le cas d'un train de marchandises chargé franchissant une section longue de 800 km dans une région montagneuse, la locomotive étant successivement équipée d'un filtre d'entrée et laissée sans filtrage. Les résultats figurent au tableau 2. Les filtres ont été du type à valeur constante, largement utilisés sur les locomotives électriques. Dans le cas du circuit à modulation de largeur d'impulsion MLI, un filtre à résistance-condensateur à large bande a été utilisé. Pour la reste, des filtres accordés sur la 3^{e} harmonique ont été utilisés.

Les consignes applicable à la ligne considérée ont fait que la moyenne des vitesse pratiquées a été de 51 km/h. La vitesse généralement pratiquée a été de 50 km/h et la vitesse de pointe de 88 km/h.

Du tableau, on constate que les variations de rendement sont plutôt faibles, à l'exception du circuit MLI où la chute de tension due à la commutation est plus forte. La chute dans le rendement due aux filtres à valeur constante utilisés est part ailleurs évidente. Aux basses valeurs de vitesse et de puissance, les filtres à valeur constante surcompensent le facteur de déphasage en arrière caractérisant tous les circuits de puissance, entraînant une forte chute dans le rendement. Même si les filtres ont réussi à réduire la teneur en

harmoniques (HF[1] et TIF[2] . I_{rms}[3]), le rapport VA/kW a été généralement plus élevé.

TABLEAU 2

MOYENNES DES PERFORMANCES DANS LE CAS D'UNE LIGNE LONGUE DE 800 KM DANS UNE RÉGION MONTAGNEUSE

Cuicuit de puissance	Montage 3 ponts, à réglage de phase		Montage 2 ponts, à réglage de phase		Montage 2 ponts, commande symétrique		Conversion ca-cc à modulation de largeur d'impulsions		Conversion ca-cc-cc redresseur -hacheur	
Moteur	Série		Shunt		Shunt		Shunt		Shunt	
Filtre d'entrée	non	oui	non	oui	non	oui	non	oui	non	oui
Rendement	.857	.73	.85	.74	.84	.73	.81	.66	.84	.74
TIF . I_{rms} (milliers)	35.5	29	41	33.6	40.3	33.5	187	49.2	59	47.4
kVA/kW (1/fp)	1.16	1.24	1.08	1.36	1.03	1.45	1.29	1.51	1.07	2.4
HF	.34	.153	.30	.12	.20	.07	.50	.06	.34	.08

Le cas de circuit MLI est particulièrement épineux puisqu'il nécessite un condensateur embarqué très encombrant pour délivrer le courant de commutation décessaire aux thyristors à action rapide. Dans tous les autres cas, une gamme de filtres accordés pourrait être utilisér pour obtenir un niveau de compensation acceptable. L'élimination des harmoniques serait moins totale, l'encombrement, la complexité et le

1 Harmoniques superieures

2 Telephone influence factor = facteur de perturbaton téléphonique

3 I valeur efficace

coût de premier établissement seraient plus élevés, mais il y aurait une nette amélioration du facteur de déphasage et du rendement.

Dans l'application particulière considérée, le circuit à commande symétrique sans filtrage semble devoir l'emporter sur les autres. Il présente un raport kVA/kW et des résidus harmoniques comparativement faibles. Par contre, son rendement est légèrement plus bas et la teneur en harmoniques audiofréquence plus élevée. Une étude technico-économique visant à déterminer le circuit offrant le meilleur rapport performances-prix n'a pas été prévue dans le mandat.

7. CONCLUSIONS

(1) Un modèle simple, relativement fidèle a été élaboré, corrélant les puissances massiques aux temps de parcours. Cette équation est très sensible aux caractéristiques de la voie, d'où la nécessité de la caler sur chaque section de ligne, séparément. Elle est moins sensible aux caractéristiques des trains, bien que des écarts pouvant atteindre 6 p. cent ont été constatés, attribuables aux variations dans ces caractéristiques. Dans le cas de lignes étudiées, il ressort qu'une locomotive d'une capacité de surcharge de courte durée atteignant 1 530 kW et d'une puissance en régime continu de 1 150 kW aurait les performances maximales exigées par 66 p. cent de trafic.

(2) La capacité de surcharge pourrait se traduire par des performances équivalentes à celles d'un engin plus puissant, mais seulement dans certaines conditions. Les avantages peuvent en être considérables ou être nuls, selon la ligne considérée.

(3) Cette capacité de surcharge devra être soigneusement dimensionnée pour préserver la fiabilité et la durée de vie des locomotives. Elle devra aussi se répercuter sur l'ensemble du schéma d'électrification adopté, depuis le pantographe jusqu'aux roues motrices.

(4) Les coefficients d'adhérence ont une très grande influence sur la chaîne cinématique, et ils déterminent l'usure des roues et des rails. On obtient des coefficients élevés, soit en augmentant le diamètre des roues motrices, soit en réduisant la charge par essieu,, bien que dans ce dernier cas, l'effort au crochet risque de demeurer inchangé.

(5) Le facteur d'usure de la chaîne cinématique risque de devenir de plus en plus contraignant, à mesure que les puissances par essieu augmentent. Les gabarits imposés empêchent toute modification de forme permettant de prolonger la durée de vie utile de la chaîne. Par ailleurs, l'impératif de démultiplication simple interdit de hausser davantage les rapports d'engrenages, seul moyen d'accroître en même temps les puissances et les coefficients d'adhérence.

(6) Il est probable que les compagnies de chemins de fer finissent par préférer les locomotives à 4 ou 6 essieux à celles à 8. Il semble que les arguments de souplesse d'exploitation et de plus grande fiabilité apparente des trains remorqués par plusieurs locomotives l'emporteront sur les avantages d'une réduction des dépenses d'investissement et de la plus grande fiabilité des engins à 8 essieux. Quant au choix entre engins de 4 ou de 6 essieux, l'incertitude des paramètres est telle qu'il a été impossible de trancher. Ces paramètres sont: la faible proprtion du trafic remorquable par une locomotive, le comportement du pantographe et les puissances massiques.

(7) Les circuits de puissance n'apportent pas, non plus, des indications claires sur les options à favoriser, étant donné la grande variété dans les caractéristiques de voies. Néanmoins, il est clair qu'un filtrage modulé est préférable à un filtrage à valeur constante, vu la grande variété dans les conditions de service.

(8) Le choix du circuit de puissance approprié permettra de réaliser des économies sensibles dans les installations fixes, notamment par une réduction des puissances réactives en jeu. Seule une étude technico-économique détaillée pourra établir le rapport performances-prix de la commutation forcée, du filtrage embarqué et du filtrage fix au sol et des diverses méthodes pour améliorer le facteur de puissance.

POOR
QUALITY
ORIGINAL